

计及经济性最优的共享储能选型评估方法

李朝晖, 谷青发, 刘 阳, 滕卫军
(国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

摘要: 储能是促进可再生能源高效利用的关键技术之一, 对提高电力系统运行的灵活性具有重要意义, 但尚未成熟的评估选型方法阻碍了共享储能的进一步发展。故基于经济评估方法来构造共享储能评估选型模型, 通过考虑共享储能电站参数、共享储能电站经济情况和用户经济情况建立共享储能评价指标体系, 同时采用 CRITIC 赋权法(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)和 VIKOR 方法(vise kriterijumski optimizacioni racun, VIKOR)对不同共享储能电站类型方案进行评估, 最终为选择合适的共享储能电站类型提供参考。通过算例分析可知, 权重值由大到小排序前 5 个分别是共享储能电站 1 充放电效率、共享储能电站 2 容量衰减率、共享储能电站 2 放电深度、共享储能电站 2 典型日购电成本和共享储能电站 2 典型日投资成本补偿收入, 分别为 0.031 8、0.028 8、0.028 7、0.025 916、0.025 913, 2 个共享储能电站类型均为锂离子电池的方案 1 在依据群体效用值、个体遗憾值和利益比率排序时都为最优, 得到其为最优共享储能电站类型方案。

关键词: 共享储能电站; 经济评估; CRITIC; VIKOR

Research on the Selection of Shared Energy Storage Evaluation Based on Economic Evaluation Methods

LI Zhaohui, GU Qingfa, LIU Yang, TENG Weijun

(State Grid Henan Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Energy storage is one of the key technologies to promote the efficient utilization of renewable energy, which is of great significance for improving the flexibility of power system operation. However, the immature evaluation and selection methods hinder the further development of shared energy storage. Therefore, this article constructs a shared energy storage evaluation and selection model based on economic evaluation methods. By considering the parameters of shared energy storage power stations, the economic situation of shared energy storage power stations, and the economic situation of users, a shared energy storage evaluation index system is established. At the same time, CRITIC weighting method and VIKOR method are used to evaluate different types of shared energy storage power station schemes, ultimately providing reference for selecting appropriate types of shared energy storage power stations. Through example analysis, it can be seen that the top five weight values in descending order are the charging and discharging efficiency of Shared Energy Storage Station 1, the capacity decay rate of Shared Energy Storage Station 2, the discharge depth of Shared Energy Storage Station 2, the typical daily electricity purchase cost of Shared Energy Storage Station 2, and the compensation income for the typical daily investment cost of Shared Energy Storage Station 2, which are 0.031 8, 0.028 8, 0.028 7, 0.025 916, and 0.025 913, respectively, Option 1, where both types of shared energy storage power stations are lithium-ion batteries, is ranked optimal based on group utility value, individual regret value, and benefit ratio, resulting in the optimal type of shared energy storage power station.

Key words: shared energy storage power station; economic evaluation; CRITIC; VIKOR

0 引言

随着中国能源转型逐渐深入, 新能源有广阔的发展空间^[1-2]。储能能够提高风、光等可再生能源的消纳水平^[3-4], 是促进可再生能源高效利用的关键技

术之一。储能能缓解调峰压力^[5]、促进可再生能源消纳^[6]、可再生能源平滑输出^[7]等方面发挥着重要作用。储能技术及其相关应用在国家支持下逐渐发展^[8], 但其逐渐显现资源利用率相对较低、成本相对较高^[9]等问题, 共享思维有利于解决储能存在的问题^[10-11]。传统储能往往仅服务于单一个体, 彼此没有直接的联系, 运营模式较简单, 经济性较差。

共享储能借鉴共享经济概念^[12-13]，通过协调控制，为用户提供有效服务，但其在评估选型方面还不够成熟。因此，研究共享储能评估选型对共享储能发展至关重要。

共享储能因其具有能够提高储能利用率、降低总成本等作用受到广泛关注。目前，众多学者已对共享储能评估选型方向做了大量研究。文[14]建立成本效益分析模型和优化调度模型，评估了不配置储能、分别配置储能和共享储能的经济情况，并且评估了使用退役电池和新电池的经济情况。文[15]分析了分散式储能无共享、分散式储能直接电量共享、集中式储能间接电量共享和集中式储能容量共享 4 种模式的经济情况。文[16]构建的商业模式为第三方投资共享储能电站，对比了合同能源管理、两部制电价和第三方投资共享储能三种商业模式的内部收益率和动态投资回收期。文[17]建立优化调度模型和收益分配模型，评估指标为用户净收益、投资回收期和投资回报率，研究了一体化式和分散式共享储能的经济情况。文[18]考虑发展态势和市场状态建立共享储能评价指标体系，基于 FAHP 与 ITOPSIS 对共享储能进行综合评价。文[19]建立广义储能资源模型和低碳经济调度模型，分析了无储能共享、仅实际储能参与共享和广义储能共享 3 种方案的经济情况。

在本文的研究中，首先设置不同共享储能电站类型方案，根据共享储能电站参数、共享储能电站经济情况和用户经济情况建立共享储能评价指标体系，不同共享储能电站类型参数不同，不同共享储能电站类型方案根据基于多主体的共享储能运行控制过程和基于纳什议价模型的共享储能服务

定价过程得到的共享储能评价指标值不同；然后采用 CRITIC 赋权法 (criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)和 VIKOR 方法(vise kriterijumski optimizacioni racun, VIKOR)对不同共享储能电站类型方案进行评估，得到各个指标的权重值；最终求得不同共享储能电站类型方案的群体效用值、个体遗憾值和利益比率，为选择合适的共享储能电站类型提供参考。

1 共享储能评价指标体系

文中考虑共享储能电站一天租赁收入、共享储能电站一天残值收入、共享储能电站一天运维成本、共享储能电站一天购电成本、共享储能电站一天支付运营商服务费成本、共享储能电站一天投资成本补偿收入、共享储能电站一天投资成本、共享储能电站充放电效率、共享储能电站放电深度、共享储能电站容量衰减率、共享储能电站回本年限占使用年限的比例、共享储能电站回本年限、用户一天少从电网购电收入、用户一天向共享储能电站售电收入、用户一天支付共享储能电站租赁费成本、用户一天支付运营商服务费成本和用户一天支付共享储能电站投资成本补偿费成本建立共享储能评价指标体系，可得共享储能评价指标体系框架见图 1。

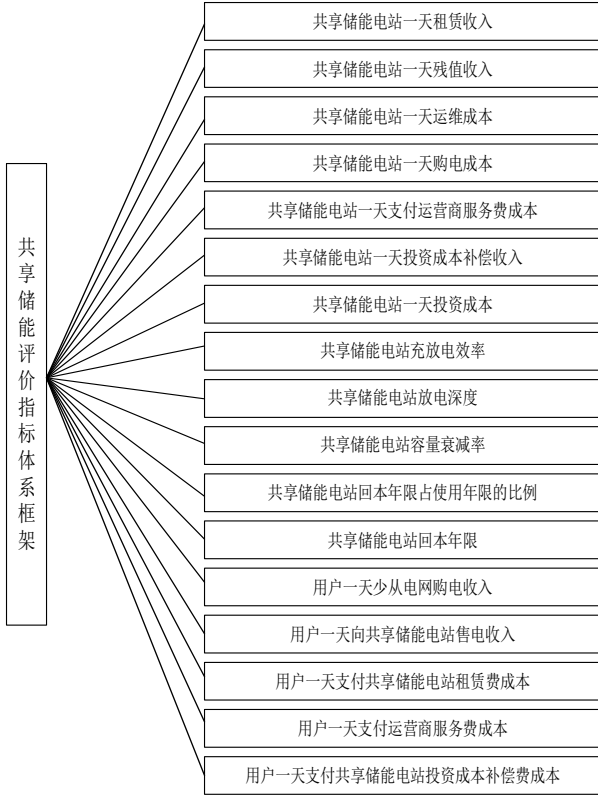


图 1 共享储能评价指标体系框架

Fig. 1 Framework of shared energy storage evaluation index system

共享储能电站一天租赁收入见式(1)

$$B_{\text{ess_ren},j}^d = \sum_{t=1}^T M_{\text{ess},j}^d P_{\text{ess_dis},j}^d(t) \quad (1)$$

共享储能电站一天残值收入见式(2)

$$B_{\text{ess_rv},j}^d = C_{\text{ess_in},j}^d V_{r,j} \quad (2)$$

共享储能电站一天运维成本见式(3)

$$C_{\text{ess_om},j}^d = \sum_{t=1}^T N_{\text{om},j}^d (P_{\text{ess_dis},j}^d(t) + P_{\text{ess_CH},j}^d(t)) \quad (3)$$

共享储能电站一天购电成本为一天从电网购电成本和经运营商从用户购买风力发电或光伏发电电能的成本之和，共享储能电站一天购电成本

$C_{\text{ess_gd},j}^d$ 见式(4)

$$C_{\text{ess_gd},j}^d = C_{\text{ess_gr},j}^d + C_{\text{ess_ab},j}^d \quad (4)$$

式(4)中，

$$\begin{cases} C_{\text{ess_gr},j}^d = \sum_{t=1}^T R_{\text{ess_gr}}^d(t) P_{\text{ess_gr},j}^d(t) \\ C_{\text{ess_ab},j}^d = \sum_{t=1}^T R_{\text{ab}}^d P_{\text{ope_edis},j}^d(t) \end{cases} \quad (5)$$

共享储能电站一天支付运营商服务费成本见式(6)

$$C_{\text{ope_ser},j}^d = \sum_{t=1}^T R_{\text{ous}}^d (P_{\text{ope_edis},j}^d(t) + P_{\text{ope_ech},j}^d(t)) \quad (6)$$

共享储能电站一天投资成本补偿收入见式(7)

$$B_{\text{ess_bc},j}^d = \left(\sum_{i=1}^I (1-\beta) B_{\text{user},i}^d \right) \left(C_{\text{ess_in},j}^d / \sum_{j=1}^J C_{\text{ess_in},j}^d \right) \quad (7)$$

共享储能电站一天投资成本见式(8)

$$C_{\text{ess_in},j}^d = C_{\text{ess_iic},j}^d F_{\text{fr},j}^d / T_{\text{day},j}^d \quad (8)$$

用户一天少从电网购电收入见式(9)

$$B_{\text{user_bg},i}^d = \sum_{t=1}^T R_{\text{user}}^d(t) (P_{\text{be},i}^d(t) - P_{\text{user_gr},i}^d(t)) \quad (9)$$

用户一天向共享储能电站售电收入见式(10)

$$B_{\text{user_ab},i}^d = \sum_{t=1}^T R_{\text{ab}}^d P_{\text{ope_uch},i}^d(t) \quad (10)$$

用户一天支付共享储能电站租赁费成本见式

(11)

$$C_{\text{user_bc},i}^d = \sum_{t=1}^T M_{\text{user},i}^d P_{\text{user_ch},i}^d(t) \quad (11)$$

用户一天支付运营商服务费成本见式(12)

$$C_{\text{ope_ser},i}^d = \sum_{t=1}^T R_{\text{ous}}^d (P_{\text{ope_udis},i}^d(t) + P_{\text{ope_uch},i}^d(t)) \quad (12)$$

用户一天支付共享储能电站投资成本补偿费成本见式(13)

$$C_{\text{f_user},i}^d = (1-\beta) B_{\text{user},i}^d \quad (13)$$

共享储能电站回本年限占使用年限的比例 δ_j

见式(14)

$$\delta_j = T_{p,j}^d / S_{L,j} \quad (14)$$

2 共享储能经济评估方法

采用 CRITIC 赋权法和 VIKOR 方法对不同共享储能电站类型方案进行评估，具体过程如下：

1) 设不同共享储能电站类型方案有 n 个，共享储能评价指标有 p 项，原始共享储能评价指标数据矩阵为

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{ip} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (15)$$

式(15)中， x_{ij} 为第 i 个共享储能电站类型方案第 j 项共享储能评价指标的数值。

2) 将共享储能评价指标进行无量纲化处理。正向化处理和逆向化处理分别见式(16)、(17)：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} (x_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq n} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq n} (x_{ij})} \quad (16)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} (x_{ij}) - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq n} (x_{ij})} \quad (17)$$

式(16)、(17)中， x'_{ij} 为经过无量纲化处理的第 i 个共享储能电站类型方案第 j 项共享储能评价指标值。

3) 共享储能评价指标变异性表示见式(18)

$$\begin{cases} a_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \\ b_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - a_j)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中： a_j 为第 j 项共享储能评价指标的平均值； b_j 为第 j 项共享储能评价指标的标准差。

4) 共享储能评价指标冲突性表示见式(19)

$$F_j = \sum_{k=1}^p (1 - f_{kj}) \quad (19)$$

式(19)中， f_{kj} 为第 k 项共享储能评价指标和第 j 项共享储能评价指标之间的相关系数。

5) 信息量 C_j 见式(20)

$$C_j = b_j \sum_{k=1}^p (1 - f_{kj}) = b_j \times F_j \quad (20)$$

6) 第 j 项共享储能评价指标的客观权重 W_j 见式

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^p C_j} \quad (21)$$

7) 第 j 项共享储能评价指标的正理想值和负理想值分别见式(22)、(23)：

$$x_j^+ = \max_{1 \leq i \leq n} (x'_{ij}) \quad (22)$$

$$x_j^- = \min_{1 \leq i \leq n} (x'_{ij}) \quad (23)$$

8) 共享储能电站类型方案的群体效用值 S_i 和个体遗憾值 R_i 分别见式(24)、(25)：

$$S_i = \sum_{j=1}^p W_j \frac{x_j^+ - x'_{ij}}{x_j^+ - x_j^-} \quad (24)$$

$$R_i = \max_{1 \leq j \leq p} \left[\frac{W_j (x_j^+ - x'_{ij})}{x_j^+ - x_j^-} \right] \quad (25)$$

9) 共享储能电站类型方案的利益比率 Q_i 见式

$$Q_i = v \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1 - v) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (26)$$

式(26)中： v 为决策机制系数；

$$S^+ = \max_{1 \leq i \leq n} (S_i) \quad (27)$$

$$S^- = \min_{1 \leq i \leq n} (S_i) \quad (28)$$

$$R^+ = \max_{1 \leq i \leq n} (R_i) \quad (29)$$

$$R^- = \min_{1 \leq i \leq n} (R_i) \quad (30)$$

10)根据利益比率 Q_i 值, 将不同共享储能电站类型方案按利益比率 Q_i 取值从小到大排序。对应不同共享储能电站类型方案排序为: a_1, a_2, \dots, a_n 。若满足如下两个条件时, 则共享储能电站类型方案 a_1 为最优共享储能电站类型方案。

条件 1: $Q(a_2) - Q(a_1) \geq 1/(n-1)$ 。

条件 2: 将不同共享储能电站类型方案的群体效用值 S_i 和个体遗憾值 R_i 从小到大排序, 共享储能电站类型方案 a_1 在依据 S_i 或 R_i 排序时依然为最

优。

3 共享储能经济评估模型

考虑基于多主体的共享储能运行控制过程和基于纳什议价模型的共享储能服务定价过程得到的结果, 建立相应的共享储能评价指标体系, 采用 CRITIC 赋权法和 VIKOR 方法对不同共享储能电站类型方案进行评估, 为选择合适的共享储能电站类型提供参考。CRITIC 赋权法考虑共享储能评价指标的变异性和共享储能评价指标之间的冲突性^[20-21], 通过共享储能评价指标的数据求得共享储能评价指标的客观权重。VIKOR 方法考虑群体效用值和个体遗憾值对不同共享储能电站类型方案进行排序^[22-23]。最终得共享储能经济评估框架见图 2。

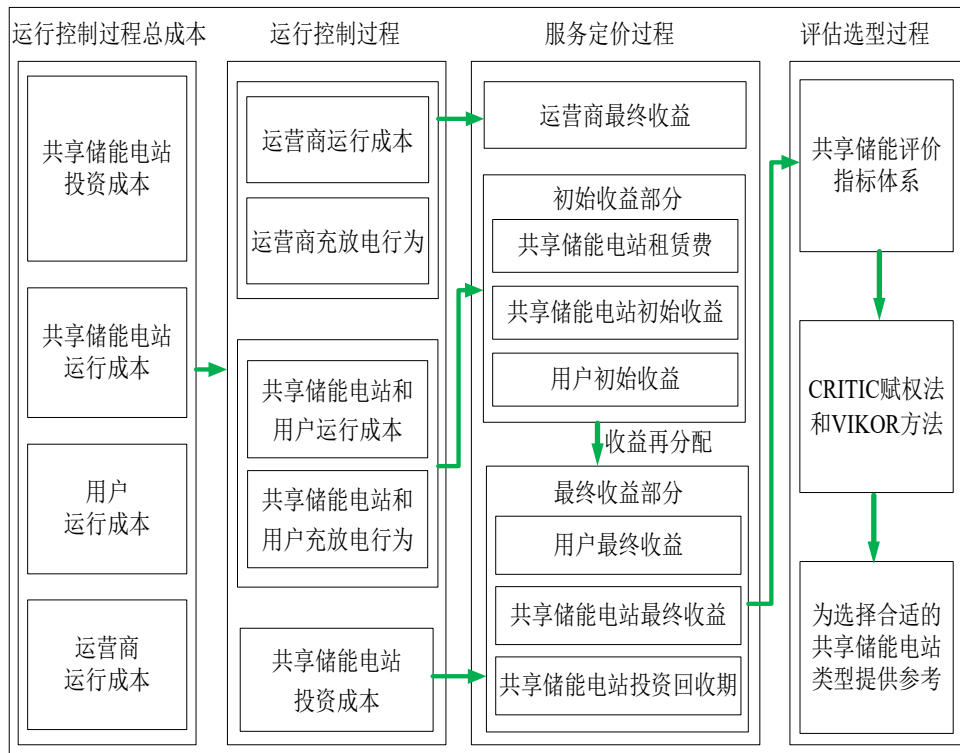


图 2 共享储能经济评估框架

Fig. 2 Evaluation framework of shared energy storage economy

4 实验结果与分析

4.1 初始参数

不同共享储能电站类型的参数不同，部分参数参考文[24-25]，3种储能参数见表1。文中研究6种共享储能电站类型方案，6种共享储能电站类型方案如下：

方案1 两个共享储能电站类型均为锂离子电池；

方案2 两个共享储能电站类型均为铅酸电池；

方案3 两个共享储能电站类型均为钠硫电池；

方案4 两个共享储能电站类型一个为锂离子电池一个为铅酸电池；

方案5 两个共享储能电站类型一个为锂离子电池一个为钠硫电池；

方案6 两个共享储能电站类型一个为铅酸电池一个为钠硫电池。

表1 3种储能参数

Table 1 Three types of energy storage parameters

参数及单位	锂离子电池	铅酸电池	钠硫电池
充放电效率/%	95	85	86

放电深度/%	90	70	100
容量衰减率/%	0.000 171	0.000 411	0.000 001 14
年限/年	13	4	13
单位功率成本/(元/kW)	300	300	300
单位容量成本/(元/kWh)	1 500	500	2 300
运维成本价格/(元/kW)	0.05	0.05	0.10

共享储能运营系统包括多个主体，建立涉及多个主体的共享储能评价指标体系，共享储能评价指标体系见图3，为充分考虑共享储能电站1、共享储能电站2、用户1、用户2、用户3和用户4的情况，共设置了42项共享储能评价指标，因为六种共享储能电站类型方案中用户1和用户4典型日向共享储能电站售电收入的值相同，所以未作为指标列出。此外，若用户数量增加或共享储能电站数量增加等，会使指标数也随之增加，可采用能够筛选关键指标的方法，将不重要的指标剔除，精简共享储能评价指标体系^[26-27]。

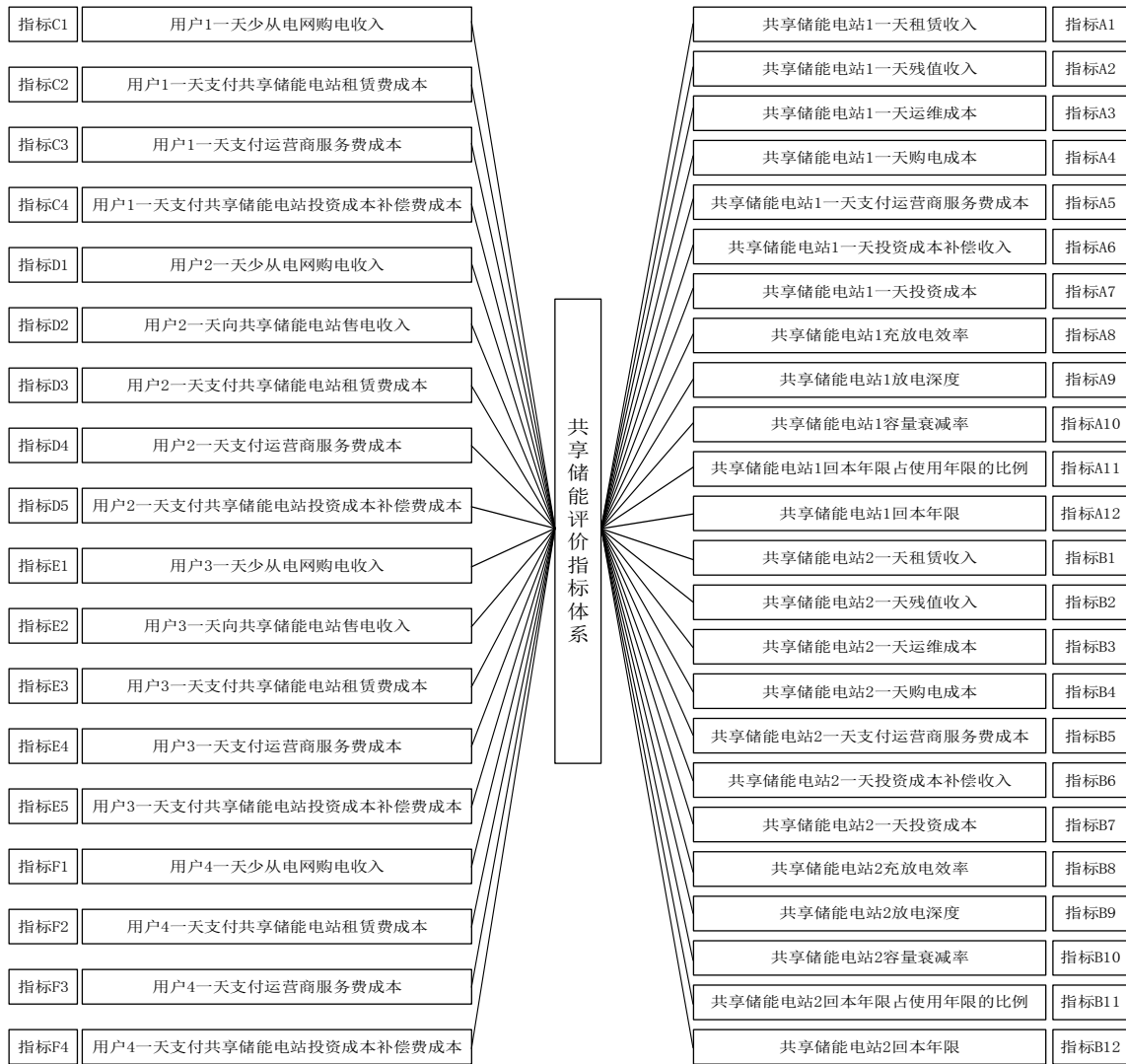


图3 共享储能评价指标体系

Fig. 3 Shared energy storage evaluation index system

4.2 结果分析

6种不同共享储能电站类型方案指标结果见表2，通过共享储能运行控制过程和共享储能服务定

价过程得到这6种方案中共享储能电站和用户的经济情况，不同共享储能电站类型的电池参数不同，得到的指标值也不同。

表2 6种不同共享储能电站类型方案指标结果

Table 2 Results of the scheme indicators of six different shared energy storage power station types

指标	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
$A_1/\text{元}$	11 643.155 1	7 346.295 8	5 635.768 7	15 854.099 8	19 134.739 2	14 795.759 0
$A_2/\text{元}$	757.085 0	472.605 9	333.937 0	1 119.493 9	1 290.457 8	1 074.360 5
$A_3/\text{元}$	2 534.849 9	1 678.363 7	2 264.959 1	3 272.149 4	3 558.613 6	3 041.866 3
$A_4/\text{元}$	2 629.257 8	1 800.676 6	1 171.800 0	3 095.894 1	3 366.928 5	3 178.841 1
$A_5/\text{元}$	994.292 2	667.367 2	452.991 8	1 308.859 0	1 423.444 6	1 216.744 0
$A_6/\text{元}$	6 550.892 6	3 378.856 9	1 819.844 0	8 497.427 9	8 674.748 2	6 560.578 0
$A_7/\text{元}$	7 570.850 0	4 726.059 2	3 339.369 6	11 194.938 5	12 904.577 7	10 743.604 6
$A_8/\%$	95	85	86	95	95	85
$A_9/\%$	90	70	100	90	90	70

$A_{10}/\%$	0.000 171 00	0.000 411 00	0.000 001 14	0.000 171 00	0.000 171 00	0.000 411 00
A_{11}	6.093 6/13	2.550 0/4	10.134 9/13	6.599 3/13	6.501 0/13	2.743 3/4
$A_{12}/\text{年}$	6.093 6	2.550 0	10.134 9	6.599 3	6.501 0	2.743 3
$B_1/\text{元}$	7 648.328 1	9 873.777 4	13 050.544 0	3 236.387 4	1 467.093 8	3 319.406 7
$B_2/\text{元}$	424.835 6	710.996 8	928.639 5	199.159 5	55.274 4	180.725 7
$B_3/\text{元}$	1 665.130 0	2 255.809 1	5 244.893 9	755.437 0	608.860 0	1 346.529 1
$B_4/\text{元}$	1 575.432 9	2 914.871 7	2 713.500 0	789.444 3	315.000 0	696.6 407
$B_5/\text{元}$	666.051 7	854.895 9	1048.978 8	302.174 4	121.772 0	269.305 8
$B_6/\text{元}$	3 676.010 7	5 083.213 0	5 060.772 9	1 511.704 0	371.567 2	1 103.600 6
$B_7/\text{元}$	4 248.356 2	7 109.968 3	9 286.395 4	1 991.594 9	552.744 3	1 807.256 7
$B_8/\%$	95	85	86	85	86	86
$B_9/\%$	90	70	100	70	100	100
$B_{10}/\%$	0.000 171 00	0.000 411 00	0.000 001 14	0.000 411 00	0.000 001 14	0.000 001 14
B_{11}	5.458 3/13	2.830 1/4	11.445 6/13	2.433 9/4	6.903 4/13	8.974 6/13
$B_{12}/\text{年}$	5.458 3	2.830 1	11.445 6	2.433 9	6.903 4	8.974 6
$C_1/\text{元}$	9 402.620 0	8 876.024 4	7 662.414 3	9 965.999 5	8 062.385 5	9 536.076 8
$C_2/\text{元}$	4 671.917 6	4 781.239 1	4 955.822 0	5 376.460 3	4 768.579 1	5 775.796 4
$C_3/\text{元}$	244.400 0	234.669 8	220.756 5	261.956 2	219.678 0	250.625 7
$C_4/\text{元}$	2 358.801 2	2 045.707 8	1 358.567 9	2 279.441 5	1 652.714 2	1 870.477 4
$D_1/\text{元}$	8 698.744 0	8 422.770 0	5 802.024 9	9 293.538 0	9 125.206 7	9 276.114 4
$D_2/\text{元}$	1 339.2	1 339.2	1 339.2	1 339.2	1 206.9	1 339.2
$D_3/\text{元}$	4 483.103 7	4 607.233 8	3 691.021 4	4 596.220 2	4 952.109 8	5 202.682 8
$D_4/\text{元}$	482.800 0	474.200 0	423.733 8	477.600 0	442.954 4	477.057 0
$D_5/\text{元}$	2 536.020 1	2 340.268 1	1 513.234 8	2 779.458 9	2 468.521 2	2 467.787 3
$E_1/\text{元}$	5 769.955 0	5 551.743 0	3 395.852 0	4 710.806 2	7 040.216 6	2 153.685 2
$E_2/\text{元}$	2 314.8	2 309.4	2 314.8	2 314.8	2 243.7	2 304.9
$E_3/\text{元}$	2 677.274 7	2 707.989 3	1 857.939 3	2 249.010 6	3 730.063 0	1 167.392 9
$E_4/\text{元}$	625.000 0	617.000 0	577.891 7	602.477 1	630.229 7	552.467 1
$E_5/\text{元}$	2 391.240 1	2 268.076 9	1 637.410 5	2 087.059 2	2 461.812 0	1 369.362 6
$F_1/\text{元}$	13 649.014 2	8 936.037 5	13 203.930 4	12 864.141 0	12 329.983 7	10 088.297 5
$F_2/\text{元}$	7 459.186 6	5 123.610 0	8 181.534 6	6 868.796 3	7 151.093 3	5 969.294 8
$F_3/\text{元}$	308.144 0	196.393 3	279.588 6	269.000 0	252.354	205.900 0
$F_4/\text{元}$	2 940.841 8	1 808.017 1	2 371.403 6	2 863.172 4	2 463.268 0	1 956.551 4

共享电站收入、成本对比见图 4、5；4 个用户典型日收入、成本对比见图 6、7。由图 4-7 可得，从 2 个共享储能电站典型日的收入指标来看，在 6 种方案中租赁收入在所有收入中占比最大，其次为共享储能电站投资成本补偿收入，最小为共享储能电站残值收入。从 4 个用户典型日的收入指标来看，在六种指标中用户 4 一天少从电网购电收入在所有收入中占比最大，用户 1 一天少从电网购电收入次之，用户 2 一天向共享储能电站售电收入在所有收入中占比最小。从两个共享储能电站典型日的成本

指标来看，在 6 种方案中运营商服务费成本在所有成本中占比最小。从 4 个用户典型日的成本指标来看，在 6 种方案中支付共享储能电站租赁费成本和支付共享储能电站投资成本补偿费成本占比较大，最小为支付运营商服务费成本。共享储能电站租赁价格、进行收益再分配和共享储能电站投资成本等对共享储能电站和用户影响较大，值得关注。从共享储能电站回本的情况来看，在 6 种方案中两个共享储能电站均可在使用年限内回本。

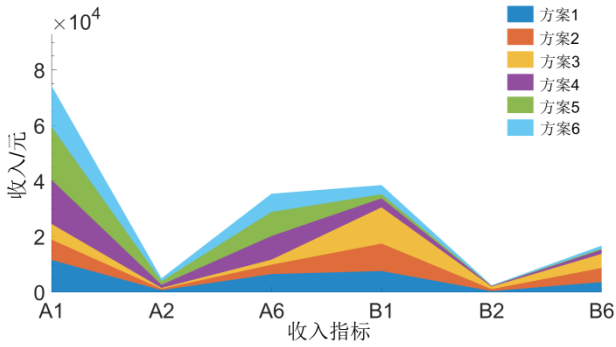


图4 共享电站收入对比

Fig. 4 Comparison of revenue from shared power stations

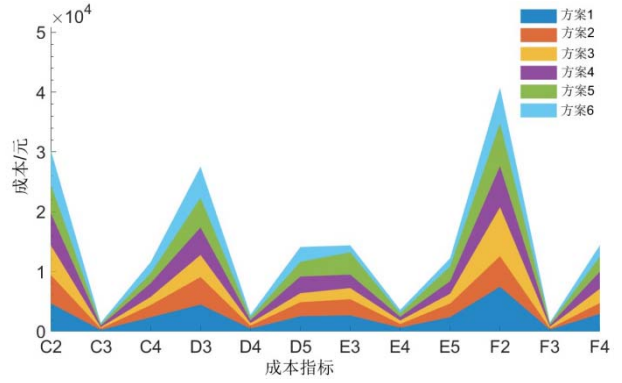


图5 共享电站成本对比

Fig. 5 Cost comparison of shared power stations

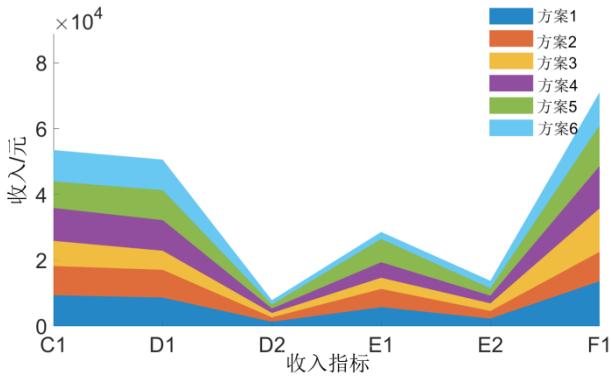


图6 4个用户典型日收入对比

Fig. 6 Comparison of typical daily income of four users

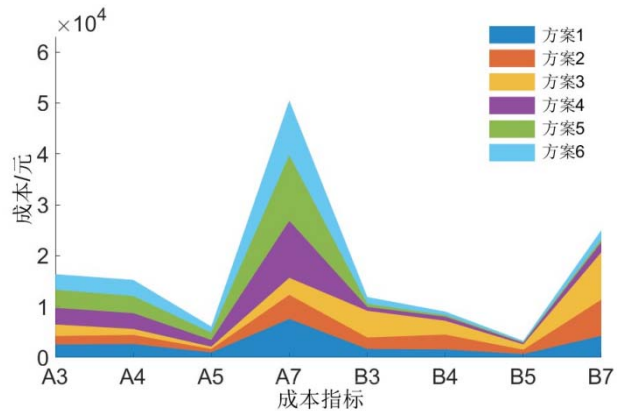


图7 4个用户典型日成本对比

Fig. 7 Comparison of typical daily costs for four users

通过共享储能评价指标的变异性和共享储能评价指标之间的冲突性得到信息量，求得共享储能评价指标权重，见图8，权重值由大到小排序前五个分别是共享储能电站1充放电效率(A_8)、共享储能电站2容量衰减率(B_{10})、共享储能电站2放电深度(B_9)、共享储能电站2典型日购电成本(B_4)和共享储能电站2典型日投资成本补偿收入(B_6)，应关注相应指标。

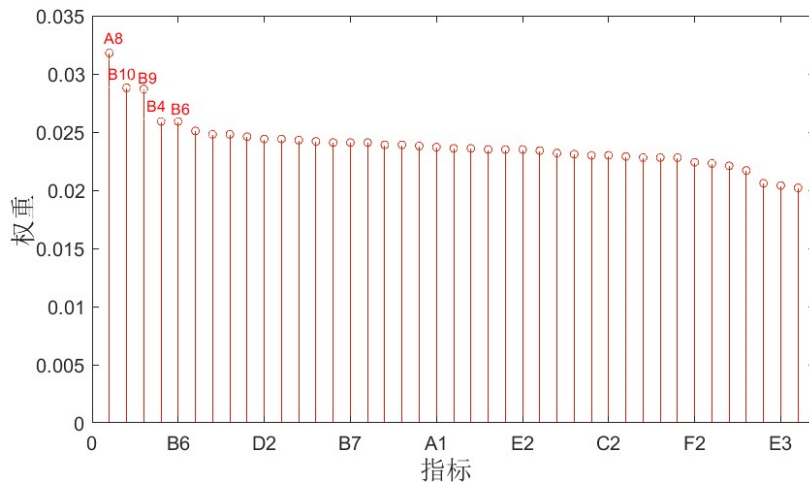


图8 共享储能评价指标权重

Fig. 8 Weight of shared energy storage evaluation indicators

决策机制系数 $v=0.5$ ，采用 VIKOR 方法对不同共享储能电站类型方案进行评估，得到不同共享储能电站类型方案的群体效用值 S_i 、个体遗憾值 R_i 和利益比率 Q_i ，将不同共享储能电站类型方案按利益比率 Q_i 从小到大进行排序，见表 3。 a_1 为方案 1， a_2 为方案 5，由于 $Q(a_2)-Q(a_1)=0.225-0=0.225$

$1 \geq 1/(n-1)=1/(6-1)=0.2$ ，满足条件 1，方案 1 在群体效用值 S_i 、个体遗憾值 R_i 和利益比率 Q_i 中的排序相同，方案 1 在依据 S_i 和 R_i 排序时依然为最优，满足条件 2。根据 VIKOR 方法^[28]确定方案 1 为决策机制系数 $v=0.5$ 时的最优共享储能电站类型方案。

表 3 不同共享储能电站类型方案评估情况

Table 3 Evaluation of different types of shared energy storage plants

方案	S_i	R_i	Q_i	Q_i 排名
方案 1	0.442 0	0.025 1	0.000 0	1
方案 2	0.518 5	0.031 8	1.000 0	6
方案 3	0.461 5	0.028 6	0.391 4	3
方案 4	0.502 8	0.028 8	0.672 5	4
方案 5	0.466 8	0.025 9	0.225 1	2
方案 6	0.483 9	0.031 8	0.773 5	5

5 结论

建立共享储能评价指标体系，得到不同共享储能电站类型方案对应的指标值，采用 CRITIC 赋权法得到各个指标的权重值，采用 VIKOR 方法对不同共享储能电站类型方案进行评估，为选择合适的共享储能电站类型提供参考。

1)不同共享储能电站类型的电池参数不同，得到的指标值也不同。在本章算例中，从两个共享储能电站典型日的收入指标来看，在 6 种方案中租赁收入在所有收入中占比最大，其次为投资成本补偿收入，从 2 个共享储能电站典型日的成本指标来看，在 6 种方案中运营商服务费成本在所有成本中占比最小，从 4 个用户典型日的成本指标来看，在 6 种方案中支付共享储能电站租赁费成本和支付共享储能电站投资成本补偿费成本占比较大，共享储能电站租赁价格、进行收益再分配和共享储能电站投

资成本等对共享储能电站和用户影响较大，可关注。

2)采用 CRITIC 赋权法得到各个指标的权重值后，对于权重值大的指标应更关注。在本章算例中，权重值由大到小排序前 5 个分别是共享储能电站 1 充放电效率、共享储能电站 2 容量衰减率、共享储能电站 2 放电深度、共享储能电站 2 典型日购电成本和共享储能电站 2 典型日投资成本补偿收入，分别为 0.031 8、0.028 8、0.028 7、0.025 916、0.025 913。

3)建立指标体系，通过 CRITIC 赋权法和 VIKOR 方法对不同共享储能电站类型方案进行评估，为选择合适的共享储能电站类型提供参考。在本章算例中，两个共享储能电站类型均为锂离子电池的方案 1 在依据群体效用值、个体遗憾值和利益比率排序时都为最优， $Q(a_2)-Q(a_1)=0.225-0=0.225$
 $1 \geq 1/(n-1)=1/(6-1)=0.2$ ，得到其为最优共享储能电站

类型方案。

参考文献:

- [1] 李建林, 崔宜琳, 熊俊杰, 等. “两个一体化”战略下储能应用前景分析[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 1-8.
LI Jianlin, CUI Yilin, XIONG Junjie, et al. Analysis on application prospect of energy storage under the strategy of “two integrations” [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 1-8.
- [2] 闫涛, 陈继忠, 闫雪生, 等. 构网型储能系统现场调试平台电网扰动控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 30-38.
YAN Tao, CHEN Jizhong, YAN Xuesheng, et al. Research on power grid disturbance control strategy for grid-forming energy storage equipment on-site commissioning system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 30-38.
- [3] 郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 65-74.
ZHENG Yunping, JIAO Chunlei. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced Generation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [4] 李建林, 崔宜琳, 王含, 等. 十四五储能典型政策解析[J]. 电器与能效管理技术, 2020(10): 1-6.
LI Jianlin, CUI Yilin, WANG Han, et al. Analysis of typical policies for energy storage in the 14th five-year plan[J]. Low Voltage Apparatus, 2020(10): 1-6.
- [5] 徐国栋, 程浩忠, 马紫峰, 等. 用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 3-11.
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 3-11.
- [6] 杨军峰, 郑晓雨, 惠东, 等. 储能技术在送端电网中促进新能源消纳的容量需求分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(4): 698-704.
YANG Junfeng, ZHENG Xiaoyu, HUI Dong, et al. Capacity demand analysis of energy storage in the sending-side of a power grid for accommodating large-scale renewables[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(4): 698-704.
- [7] LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: A business case study[J]. Applied Energy, 2017(188): 226-236.
- [8] 李建林, 张则栋, 谭宇良, 等. 碳中和目标下储能发展前景综述[J]. 电气时代, 2022(1): 61-65.
LI Jianlin, ZHANG Zedong, TAN Yuliang, et al. Overview of energy storage development prospects under Carbon neutrality goals[J]. Electric Age, 2022(1): 61-65.
- [9] ZHANG Wenyi, WEI Wei, CHEN Laijun, et al. Service pricing and load dispatch of residential shared energy storage unit[J]. Energy, 2020(202): 117543.
- [10] 李明, 焦春雷, 李晓龙, 等. 储能安全标准研究及储能在构网型新场景中的应用[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 20-29, 38.
LI Ming, JIAO Chunlei, LI Xiaolong, et al. Research on energy storage safety standard and application of energy storage system in grid-forming scenario[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 20-29, 38.
- [11] 李建林, 崔宜琳, 马速良, 等. 需求侧共享储能的运营模式优化及其经济效益分析研究[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4954-4965.
LI Jianlin, CUI Yilin, MA Suliang, et al. Operation mode optimization and economic benefit analysis of demand-side shared energy storage[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4954-4965.
- [12] 李建林, 梁策, 张则栋, 等. 新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 104-116.
LI Jianlin, LIANG Ce, ZHANG Zedong, et al. Analysis of energy storage policies and business models in new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 104-116.
- [13] 赵峰, 张帆, 陈小强, 等. 基于VMD-APSO的风电场混合储能系统容量优化配置[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 120-127.
ZHAO Feng, ZHANG Fan, CHEN Xiaoqiang, et al. Optimal configuration of capacity of wind farm hybrid energy storage system based on VMD-APSO algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 120-127.
- [14] 冯亮, 鉴庆之, 田浩, 等. 考虑共享储能容量衰减的零碳园区优化调度与经济性评估[J]. 电力建设, 2022, 43(12): 112-121.
FENG Liang, JIAN Qingzhi, TIAN Hao, et al. Optimal dispatch and economic evaluation of zero Carbon park considering capacity attenuation of shared energy storage[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 112-121.

- [15]朱宗耀, 王秀丽, 吴 雄, 等. 考虑多场景规划的共享储能投资及运营分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 23-31.
ZHU Zongyao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Investment and operation analysis of shared energy storage considering multi-scenario planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 23-31.
- [16]俞容江, 陈致远, 尹建兵, 等. 第三方投资共享储能电站商业模式及其经济性评价[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 78-85.
YU Rongjiang, CHEN Zhiyuan, YIN Jianbing, et al. Business model and economic evaluation of third-party invested and shared energy storage[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 78-85.
- [17]刘亚锦, 代 航, 刘志坚, 等. 面向多类型工业用户的分散式共享储能配置及投资效益分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 256-264.
LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, et al. Configuration and investment benefit analysis of decentralized shared energy storage for multiple types of industrial users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 256-264.
- [18]邱伟强, 王茂春, 林振智, 等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.
QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of Carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255.
- [19]田壁源, 常喜强, 徐海奇, 等. 共享模式下园区用户侧广义储能低碳经济调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(6): 99-105.
TIAN Biyuan, CHANG Xiqiang, XU Haiqi, et al. Low Carbon economic scheduling strategy of GES at the user side of the park under the sharing mode[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 99-105.
- [20]ZHONG Shuheng, CHEN Yiyu, MIAO Yinjun. Using improved CRITIC method to evaluate thermal coal suppliers[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 195.
- [21]SHI Hongtao, LI Yifan, JIANG Zhongnan, et al. Comprehensive power quality evaluation method of microgrid with dynamic weighting based on CRITIC[J]. Measurement and Control, 2021, 54(5-6): 1-8.
- [22]王志愿, 闫磊磊, 邓迎寅, 等. 基于熵权与 VIKOR 方法的设计方案评价与优选[J]. 机械设计, 2022, 39(2): 154-160.
WANG Zhiyuan, YAN Leilei, DENG Yingyin, et al. Evaluation and optimization of design schemes based on entropy weight and VIKOR method[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(2): 154-160.
- [23]CHATTERJEE P, CHAKRABORTY S.A comparative analysis of VIKOR method and its variants[J]. Decision Science Letters, 2016, 5(4): 469-486.
- [24]苏 伟, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 储能技术经济性评估方法综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 29-35.
SU Wei, ZHONG Guobin, XU Kaiqi, et al. Review of evaluation method for economy of energy storage technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 29-35.
- [25]刘 阳, 滕卫军, 谷青发, 等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1): 312-318.
LIU Yang, TENG Weijun, GU Qingfa, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(1): 312-318.
- [26]马 昭, 赵会茹, 霍慧娟, 等. 基于改进三角模糊 VIKOR 法的用户储能系统配置方案综合评估[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 185-191.
MA Zhao, ZHAO Huiru, HUO Huijuan, et al. Comprehensive evaluation of user energy storage system configuration schemes based on the improved triangular fuzzy VIKOR method[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 185-191.
- [27]姚 艳, 吴红斌, 林 达, 等. 配电网中储能系统的多维价值评估及应用[J]. 浙江电力, 2022, 41(12): 36-45.
YAO Yan, WU Hongbin, LIN Da, et al. Multi-dimensional value assessment and application of energy storage system in distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(12): 36-45.
- [28]REN Donglin, LIU Liang, GONG Xiujuan, et al. Effect evaluation of ecological compensation for strategic mineral resources exploitation based on VIKOR-AISM model[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 15969.

李朝晖(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为发电生产过程控制、电站集成自动化、计算机仿

真与自动测试(通信作者)(E-mail: LzhaoHui824@163.com)。